철근 배근 방법에 의한 철근콘크리트의 전자파 차폐특성 평가

Evaluating of Electromagnetic Shielding Characteristics of Reinforced Concrete Using Reinforcing Details

최진석* · 원천봉** · 홍세희*** · 윤영수****

Choi, JinSeok*, Yuan, TianFeng**, Hong, SeHee***, and Yoon, YoungSoo****

Abstract

In this study, experimental tests were performed to determine the electromagnetic shielding characteristics of reinforced concrete based on the thickness of concrete and rebar. In addition, the electromagnetic shielding characteristics based on the steel-fiber volume ratio and rebar spacing of fiber-reinforced concrete were evaluated. Concrete showed significant Shielding Effectiveness (SE) in a high-frequency band with increasing thickness, but the rebar exhibited significant SE in the low-frequency band with increasing diameter, decreasing rebar spacing, and increasing layer. The SE increased with the steel fiber volume ratio, and it also increased owing to the decrease in the rebar spacing for 1.5 vol.% steel fibers.

Key words : Electromagnetic Shielding, Reinforced Concrete, Rebar, Steel Fiber

요 지

본 연구에서는 콘크리트의 두께와 철근 보강에 따른 철근콘크리트의 전자파 차폐특성에 관한 실험을 수행하였다. 또한, 섬유보강 콘크리트의 강섬유 혼입률 및 철근 간격에 따른 전자파 차폐특성을 평가하였다. 콘크리트는 두께의 증가에 따라 높은 주파수 대역에서 전자파 차폐에 큰 효과를 나타냈으며 철근은 직경의 증가, 철근 간격의 감소 및 보강 층의 증가에 따라 낮은 주파수 대역에서 전자파 차폐에 큰 효과를 나타냈다. 강섬유의 혼입률이 증가할수록 차폐율이 증가하였으며 강섬유를 1.5% 혼입한 변수에서 철근 간격의 감소로 인한 차폐율 증가를 나타냈다.

핵심용어 : 전자파 차폐, 철근콘크리트, 철근, 강섬유

1. 서 론

정보통신의 발달과 더불어 빅데이터(Big Data), 클라우드(Cloud) 기반 산업이 활발해지고 있으며 많은 양의 데이터가 경제적으로 환산할 수 없는 고부가가치를 갖고 있다. 따라서 다양한 산업의 데이터 서버와 데이터 저장장치의 회로 및 설비가 낙뢰나 Electromagnetic Pulse (EMP) 공격으로부터 보호되어야 할 필요성이 있다.

EMP란 고출력 전자기파를 통칭하는 용어로 강력한 유도 작용에 의해 과전류를 발생시켜 전자회로를 파괴한다. 따라서 이런 피해를 방지하기 위해 중요 시설의 경우 기본적으로 도전성 금속판을 제작하여 EMP 방호시설을 건설하게 된다(Seo et al., 2014). 시설물 관점에서 주요 방호시설 중 하나인 철근콘크리트 구조물에 의해 일차적인 전자파 차폐가 이루어지면, 별도의 공간을 요구하며 높은 설치 및 유지관리 비용이 발생하는 기존 차폐용 금속판의 일부분을 대체할 수 있다.

*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정(E-mail: radiance@korea.ac.kr)

Member, Master's Course, School of Environment and Architectural Engineering, Korea University

**정회원, 고려대학교 초대형건설기술연구소 연구교수(E-mail: yuantianfeng@korea.ac.kr)

Member, Research Professor, Research Institute for Mega Construction, Korea University

***정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정(E-mail: bestshhong@korea.ac.kr)

Member, Doctor's Course, School of Environment and Architectural Engineering, Korea University

****교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수(Tel: +82-2-3290-3320, Fax: +82-2-928-7656, E-mail: ysyoon@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Environment and Architectural Engineering, Korea University

기존에 철근콘크리트 구조물의 전자파 차폐특성에 관한 다양한 연구가 수행되었다. 전도성 재료의 혼입이 없는 일반적인 콘크리트의 경우 약 10 dB 이하의 전자파 차폐성능을 나타내며, 철근의 경우 낮은 주파수 대역에서 차폐특성을 나타내는 것으로 알려져 있으나 전자기적 모델링에 의한 해석 연구가 대부분이며 전자파 송·수신 안테나에 의한 실증실험 연구는 미비한 현황이다(Bihua et al., 2000; Dalke et al., 2000; Richalot et al., 2000; Hyun et al., 2014).

또한, 전자파 차폐는 차폐재의 전기전도도가 높을수록 그 효과가 큰 것으로 알려져 있다. 일반적으로 콘크리트의 전기저항은 매우 크기 때문에 전도성이 없는 부도체로 여겨지나 최근에는 전도성섬유(강섬유, 탄소섬유), 흑연 및 철생산의 부산물 등 전도성 있는 재료를 혼입한 전기전도성 콘크리트에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다(Lee et al., 2019; Lee et al., 2020; Yehia et al., 2000). 특히, 다양한 전도성 재료 중 강섬유는 콘크리트의 결점인 취성을 보완하기 위한 보강 재료로 높은 기계적 강도(150 MPa 이상의 압축강도, 8 MPa의 인장강도)와 높은 에너지 흡수 능력의 장점이 있어서 방호시설물로서 활용하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다(Yoo et al., 2018; Yuan et al., 2020).

따라서 본 연구에서는 전자파 송·수신 안테나를 사용하여 철근콘크리트의 두께 및 철근 보강에 의한 전자파 차폐율 평가와 방호시설물에서 적용성이 큰 강섬유보강 콘크리트에 의한 전자파 차폐특성을 확인하고자 하였으며 강섬유 혼입률에 따른 철근콘크리트의 전자파 차폐율을 평가하였다. 이러한 전자파 차폐율 실험 결과를 EMP 방호시설로써 철근콘크리트의 철근 배근 및 강섬유 혼입률에 대한 참고자료로 활용하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 배합표

본 실험에서는 1종 포틀랜드 시멘트(비표면적 3,413 cm²/g, 밀도 3.15 g/cm³)와 20 mm의 최대치수를 갖는 굵은골재를 사용하였고, 30 MPa급 일반 강도 콘크리트의 철근 보강에 의한 전자파 차폐특성을 확인하기 위한 배합표는 Table 1과 같다. 압축강도는 측정을 위해 KS F 2405에 따라 $\phi 100 \times 200$ mm인 원주형 공시체를 제작하였고, 최대용량 2,000 kN의 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)을 이용하였다. 실험 결과 28일 재령 평균 30.7 MPa의 압축강도를 나타내었다.

Table 1. Mixture Proportions (by Weight)

Cement	Water	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	SP	S/a (%)
1.00	0.54	3.07	3.10	0.15	49.7

전도성 재료로 지름 0.55 mm, 길이 35 mm, 공칭인장강도 1,400 MPa인 후크형 강섬유를 전체 부피 대비 0.75%, 1.5% 사용하였으며 자세한 물리적, 기하학적 특성은 Table 2와 같다. 강섬유를 0.75%, 1.5% 혼입한 콘크리트는 각각 35.6 MPa, 34.7 MPa의 압축강도를 나타내었다.

Table 2. Properties of Hooked-End Steel Fibers

Diameter (mm)	Length (mm)	l_f/d_f	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
0.55	35	64	7.9	1,400	200

2.2 실험변수 및 실험방법

시험체의 크기는 전자파가 콘크리트 매트릭스 내부를 통과하지 않고 표면을 타고 넘어가는 전자파 회절의 최소화를 위해, 본 실험에서는 Log Spiral 안테나의 전체 크기보다 큰 500 × 500 × 두께(100, 200, 300) mm로 제작하였다. 철근은 D10, D13, D19 직경의 이형철근을 직경 변수로 사용하였으며 수평 및 수직 철근의 중심 간격을 동일하게 50 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm의 변수로 설정하였다. 본 연구에서는 극초단파 주파수 대역 내에서 철근 배근에 의한 전자파 차폐성능을 확인하기 위해 콘크리트 구조기준에 부합하기 위한 최소 간격을 50 mm, 최대 간격을 300 mm로 설정하였으며 벽체의 최소 수직철근비, 최소 수평철근비를 만족한다(KCI, 2017). 철근 격자 보강에 의한 전기전도망(Conductive Network)을 형성하기 위해 철근 결속선(철선)으로 수평 및 수직 철근의 교차점을 모두 결속하였다. 철근 보강 층의 경우 일단 보강과 이단 보강을 변수로 하였다. 구체적인 실험 변수명과 실험변수는 Fig. 1과 Table 3에 각각 나타내었다.

Fig. 1. Naming of Experimental Variables

차폐재의 전자파 차폐특성은 주로 ASTM D 4935의 동축형 케이블 측정방법으로 평가된다(ASTM D 4935, 2010). 그러나 이 규준은 33 mm 지름의 크기를 갖는 원형시험체로 한정되어 있어서 골재가 포함되고 철근을 보강하는 본 연구에서 적용하기에는 적합하지 않다. 또한, EMP 방호시설의 전자파 차폐성능 평가방법은 일반적으로 MIL-STD-188-125-1와 IEEE-STD-299로 알려져 있으나 이 측정방법은 안테나의 종류, 증폭기, 안테나 및 시험체 간의 거리 구성에 따라 측정 주파수 범위가 따라 달라지기 때문에 설비 확보가 쉽지 않으며 군이 아닌 실험실

Table 3. Details of Experimental Variables

No.	Specimen ID	Concrete Thickness (mm)	Diameter of Rebar	Spacing of Rebar (mm)	Layer	Steel Fiber (vol%)
1	1N-N	100	-	-	-	-
2	2N-N	200	-	-	-	-
3	3N-N	300	-	-	-	-
4	1D10-s100	100	D10	100	Single	-
5	2D10-s100	200	D10	100	Single	-
6	3D10-s100	300	D10	100	Single	-
7	1D10-d50	100	D10	50	Double	-
8	3D10-d50	300	D10	50	Double	-
9	1D10-s50	100	D10	50	Single	-
10	1D19-s50	100	D19	50	Single	-
11	1D13-s100	100	D13	100	Single	-
12	1D19-s100	100	D19	100	Single	-
13	1D10-d100	100	D10	100	Double	-
14	1D19-d100	100	D19	100	Double	-
15	1D10-s300	100	D10	300	Single	-
16	1D10-s200	100	D10	200	Single	-
17	3D10-s50	300	D10	50	Single	-
18	3D10-d50	300	D10	50	Double	-
19	1D10-d200	100	D10	200	Double	-
20	N-0.75	100	-	-	-	0.75
21	N-1.5	100	-	-	-	1.5
22	s100-1.5	100	D10	100	Single	1.5
23	s50-1.5	100	D10	50	Single	1.5

레벨에서 구현하기에는 어려움이 있다(U.S. DOD, 1998; IEEE, 2007; Lee et al., 2020).

본 실험에서는 콘크리트와 철근의 전자파 차폐특성 검토를 위해 극초단파(UHF) 주파수 대역(300 MHz~3 GHz)을 측정할 수 있는 출력 신호세기(TX Power) 20 dBm, 측정 가능 신호세기(RX Level) 20~80 dBm의 성능을 가진 Log Spiral 안테나(Inno-IT사 제품)를 사용하였다. 측정 소프트웨어 시스템은 한국산업기술시험원의 Simplified Test Equipment - KRA1500 Controller System을 사용하였으며 출력 신호세기가 19.04 dBm (기대값 20dBm)로 ± 1 dBm 내에서 신호전력을 발생시켰다. 따라서 실험실 레벨에서 적은 오차범위 내로 구현이 가능한 실험 방법을 활용하였으며 모식도는 Fig. 2(b)와 같다(Jang et al., 2019). 전자파와 안테나의 동적범위 (Dynamic Range) 특성에 의해 발생할 수 있는 측정오차를 최소화하기 위해 안테나의 중앙과 시험체의 중앙을 일치시키고 수평방향과 수직방향을 각 2회씩 측정하여 평균값을 사용하였다. 전자파 차폐특성은 소프트웨어의 출력데이터인 Shielding Effectiveness (SE)로 평가되며 SE는 Eq. (1)과 같이 입사 전자파의 수신전력 세기와 차폐 매질을 통과한 전자파의 수신전력 세기의 로그비로 나타낸다.

(a) Measurement of Shielding Effectiveness

(b) Simplified Test Equipment Diagram

Fig. 2. Experimental Program

$$SE \text{ (dB)} = -10 \log(P_o/P_i) \quad (1)$$

여기서, P_o 는 차폐 매질을 통과한 전자파의 수신전력, P_i 는 차폐 매질에 입사되는 전자파의 수신전력을 의미한다.

따라서 SE 값이 클수록 차폐 매질이 높은 차폐특성을 나타내는 것이며, SE 10 dB은 90%의 차폐 효율, 20 dB은 99%, 30 dB은 99.9%의 차폐 효율을 가진다는 것을 나타낸다 (Kim and Yi, 2015). 본 연구에서는 극초단파 주파수 대역에 포함되는 400 MHz~1,400 MHz 주파수 대역에서 SE 값을 평가하였다.

콘크리트 전자파 차폐특성에 직접적인 영향을 주는 유전율은 다양한 영향 인자에 의해 결정된다. 특히 수분 함유량과 주파수가 주요한 영향 인자이며 그 중 수분 함유량이 많을수록 콘크리트의 전자파 차폐성능은 모든 주파수 대역에서 증가한다고 제시되어 있다(Hyun et al., 2014). 따라서 본 연구에서는 수분에 의한 영향을 제외하기 위하여 28일 재령의 콘크리트 시험체들을 60 °C의 건조로에서 72시간 동안 건조 후 Wrapping 하였고 실험 시 Wrapping을 제거하여 온도 20 ± 1 °C, 습도 $60 \pm 5\%$ 를 유지하는 항온항습실에서 차폐율을 평가하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 콘크리트에 의한 전자파 차폐

Fig. 3(a)는 철근을 보강하지 않은 콘크리트 시험체들의 두께에 따른 전자파 차폐율 변화를 나타내며 Fig. 3(b)는 철근을 100 mm 간격으로 일단 보강한 콘크리트 시험체들의 두께에 따른 전자파 차폐율 변화를 나타낸다. 실험 결과 주파수 대역이 400 MHz에서 1,400 MHz로 높아질수록 전자파 차폐율이 증가하였고 콘크리트 두께가 증가할수록 모든 주파수 대역에서 전자파 차폐율이 증가하였다. 특히, 300 mm 두께의 철근을 보강하지 않은 콘크리트 시험체의 경우 주파수가 높아짐에 따라 3.98 dB@500 MHz에서 17.33@1,400 MHz로 최대 335%의 전자파 차폐율 증가를 나타냈다. 이는 주파수가 높아질수록 콘크리트 매트릭스를 통과하는 짧은 파장의 전자파 일부가 콘크리트 혼합물에 흡수 및 산란되는 감쇠(Attenuation) 효과가 크게 나타나고 콘크리트의 전자파 투과계수가 감소하기 때문이라고 판단된다(Hyun et al., 2014).

Fig. 3(c)는 50 mm 간격으로 일단 보강한 콘크리트 시험체들의 두께에 따른 전자파 차폐율 변화를 나타낸다. 낮은 주파수 대역인 400 MHz에서는 철근콘크리트 두께 증가에 따른 차폐율 변화는 작은 값을 나타냈으나 주파수 대역이 높아질수록 두 그래프 y축 값의 차이가 증가하는 경향을 나타냈다. 이를 통해 철근이 보강된 콘크리트 시험체들에서 콘크리트

(a) Concrete with Different Thickness

(b) Single Layer Reinforced Concrete with 100 mm Spacing

(c) Double Layer Reinforced Concrete with 50 mm Spacing

(d) EM Characteristics with Frequency Band

Fig. 3. EM Shielding Test Results for Concrete Thickness

두께 증가에 따른 차폐율 증가 현상은 높은 주파수 대역에서 보다 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3(d)는 주파수 대역에 따른 콘크리트 시험체들의 전자파 차폐율을 정량적으로 나타낸다. 측정 주파수 대역을 400~700 MHz, 700~1,100 MHz, 1,100~1,400 MHz인 3구간

으로 나누어 콘크리트 두께 변화(100 mm, 300 mm)에 따른 구간별 최대 전자파 차폐율의 차이(dB)를 나타내었다. N-N은 철근을 보강하지 않은 무근콘크리트를 의미하며, D10-s100은 D10 철근을 100 mm의 철근 간격으로 일단 보강한 변수, D10-d50은 D10 철근을 50 mm의 철근 간격으로 이단 보강한 변수이다. 무근콘크리트와 철근콘크리트 변수 모두 주파수 대역이 높아질수록 두께 증가에 의한 전자파 차폐율 차이(dB)가 증가하였고 이를 통해 주파수 대역이 높아질수록 콘크리트의 전자파 두께 증가에 따른 차폐율 향상이 증가함을 알 수 있다. 이는 투과계수의 정규화 특성 시뮬레이션 결과와 일치한다(Hyun et al., 2012).

3.2 철근 보강에 의한 전자파 차폐

철근콘크리트에 들어가는 철근은 구조의 종류에 따라 다르게 배근 되며 외부 하중에 저항하거나 균열발생 억제를 위해 소요철근이 결정된다. 특히, 판구조의 경우 수평철근과 수직철근의 보강이 모두 필요하며 일반적으로 단위 길이 당 철근의 면적과 간격을 결정하여 설계한다. 본 연구에서는 수평철근과 수직철근의 간격을 통일시켜 정사각형의 격자망을 구성했고 이를 통해 방향성에 따른 전자파 차폐 효과를 제외하였다. 철근은 저주파 대역 중 특히 1 GHz 이하의 주파수 대역에서 투과계수의 감소로 인해 전자파 차폐 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 철근 직경, 철근 간격, 철근 보강 층을 전자파 차폐특성의 주요 변수로 설정하였다(Dalke et al., 2000; Hyun et al., 2014; Mardiguian and Caron-Fellens, 2017).

3.2.1 철근 직경의 영향

Fig. 4는 철근 직경에 따른 전자파 차폐율을 나타낸다. D10, D19 철근을 50 mm의 간격으로 일단 보강한 철근콘크리트 변수들은 낮은 주파수 대역에서 철근 보강에 의한 전자파 차폐율 향상이 가장 높았고 주파수가 높아짐에 따라 전자파 차폐율 향상이 작게 나타났다(Fig. 4(a)). 특히, D19 철근을 보강한 변수는 400 MHz에서 29.90 dB의 높은 차폐율을 나타냈고 고주파 대역인 1,400 MHz(12.14 dB)에서의 차폐율보다 146% 높은 수치이다. 철근 직경을 D10에서 D19로 대체할 경우 모든 주파수 대역에서 전자파 차폐율을 크게 나타냈다. 철근 직경이 증가할수록 투과계수의 감소로 인해 전자파 차폐 성능이 향상된다. 특히, 낮은 주파수 대역에서 전자기장의 상호작용 거동을 바꾸기 때문으로 판단된다(Dalke et al., 2000).

반면 100 mm의 철근 간격으로 일단 또는 이단 보강된 철근콘크리트 변수들은 철근 직경 증가에 따른 작은 전자파 차폐율의 변화를 나타냈다(Figs. 4(b), (c)). 100 mm의 철근 간격에서 철근 직경이 증가할수록 철근의 격자망 내부 순간격은 90 mm, 87 mm, 81 mm로 감소하였으나 전자파 차폐율 향상에 영향을 주지 않는 큰 간격으로 판단된다.

(a) Single Layer Reinforced Concrete with 50 mm Spacing

(b) Single Layer Reinforced Concrete with 100 mm Spacing

(c) Double Layer Reinforced Concrete with 100 mm Spacing

Fig. 4. EM Shielding Test Results for Rebar Diameter

따라서 철근콘크리트 구조에서 철근에 의한 전자파 차폐 성능을 높이기 위해 철근의 직경을 증가시킬 수 있다. 그러나 철근 격자망 내부 순간격이 80 mm 이상일 경우 전자파 차폐 성능 향상을 위한 철근 직경의 증가는 효과적이지 않은 것으로 판단된다.

3.2.2 철근 간격의 영향

측정 주파수에서 철근 간격에 따른 전자파 차폐율 변화 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 일단 보강된 D10 철근의 간격 감소에 따른 전자파 차폐율의 비교를 나타낸다. 50 mm의 철근 간격 변수에서만 낮은 주파수 대역에서 미소한 차폐율 향상을 보였고 기타 철근 간격 변수들은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 특히, 300 mm의 철근 간격 변수는 모든 주파수 대역에서 보강이 없는 콘크리트 변수와 유사한 전자파 차폐율을 나타냈다. 이는 철근 간격에 대해 차폐 효과가 발생하는 최대 주파수를 계산한 Table 4에서 500 MHz 이상의 주파수 대역은 철근에 의한 차폐효과 증진을 얻을 수 없기 때문이라고 판단된다.

(a) Single Layer Reinforced Concrete with D10

(b) Single Layer Reinforced Concrete with D19

(c) Double Layer Reinforced Concrete with D10

(d) EM Characteristics with Frequency Band

Fig. 5. EM Shielding Test Results for Rebar Spacing

Table 4. Maximum Effective Frequency for Rebar Spacing

Rebar spacing	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm
Maximum f (MHz)	3,000	1,500	1,000	500

철근 보강에 의한 전자파 차폐율은 Eq. (2)로 나타낼 수 있다(Hyun et al., 2012).

$$SE \text{ (dB)} \approx 20 \log(\lambda / 2g) \quad (2)$$

여기서, λ 는 파장(m), g 는 철근 격자 간격(m)을 의미한다.

철근에 의한 전자파 차폐 효과를 얻기 위해서는 철근 격자 간격이 전자파의 반파장 보다 작아야 한다. Eq. (2)를 이용하여 각 철근 간격에 대해 차폐 효과가 발생하는 최대 주파수를 계산하면 Table 4와 같다. 이때, 전자파는 진공상태가 아닌 철근콘크리트 매트릭스를 통과하기 때문에 속도가 굴절률에 따라 바뀐다(Hong et al., 2011). 따라서 Table 4는 근사적인 계산의 조합으로 이루어져 있어서 정해(Exact Solution)는 아니나 상대적인 비교로 확인하고자 하였다(Jang and Song, 2018).

Figs. 5(b), (c)의 실험 결과는 철근 간격에 따른 큰 차폐율 변화를 나타냈다. 철근을 이단 보강한 변수들은 1,000 MHz 이상의 주파수 대역에서 철근 간격에 의한 전자파 차폐율 향상이 없음이 확인되었다(Fig. 5(c)). 이는 본 연구에서 설정한 이단 보강의 철근 층간의 거리(L_s)가 40 mm인 경우 1GHz 이상의 주파수 대역에서는 철근 간격 변화에 의한 투과계수의 변화가 작기 때문으로 판단된다(Hyun et al., 2014).

Fig. 5(d)는 주파수 대역에 따른 철근 간격의 전자파 차폐율을 정량적으로 나타낸다. Fig. 3(d)와 같이 3구간으로 주파수 대역을 나누어 100 mm, 50 mm의 철근 간격 변화에 따른 구간별 최대 전자파 차폐율의 차이(dB)를 나타내었다. D19-s는 100 mm 콘크리트 두께에 D19 철근을 일단 보강한 변수, D10-d는 100 mm 콘크리트 두께에 D10 철근을 이단 보강한 변수이다. 고주파 대역에서 두께 증가에 따른 전자파 차폐율이 크게 나타난 콘크리트 변수들(Fig. 3(d))과는 반대로 철근의 간격에 따른 전자파 차폐율 차이는 저주파 대역에서 크게 나타났고 주파수가 높아짐에 따라 감소했다.

3.2.3 철근 보강 층의 영향

Fig. 6(a)는 D10 철근을 50 mm 간격으로 일단 및 이단 보강하였을 때 전자파 차폐율 결과를 나타낸 것이다. 100 mm 두께의 시험체에서 Fig. 7에 묘사된 철근 배근 층간의 거리 L_s 는 40 mm이고 두께 300 mm 시험체의 L_s 는 120 mm이다. 두 변수 모두 배근 층의 증가로 전자파 차폐 성능이 향상되었으며 낮은 주파수 대역에서 더 효과적으로 나타났다. 이는 철근을 일단에서 여러 층으로 확장하면 도파관의 길이를 증가시키는 것과 같은 효과를 가지기 때문이다(Hyun et al., 2012). 따라서 공진이 발생하지 않는 주파수 대역에서는 철근을 이단 보강하면 전자파 차폐 효과가 높아지며 낮은 주파수 대역에서 그 효과가 더욱 크다.

반면, 철근 배근 층간의 거리가 40 mm와 120 mm 변수들을 비교하면 단일 배근과 이단 배근의 전자파 차폐율 차이가 L_s 에 따라 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 L_s 증가에 따라 투과계수가 감소하는 기존 해석 연구에서의 실험결과와는 다소 상이한데 철근만의 해석을 수행한 기존 연구와는 달리 본 연구에서는 콘크리트 매트릭스로 철근 층 사이를 구성하

(a) Reinforced Concrete with 50 mm Spacing

(b) Reinforced Concrete with 100 mm Spacing

(c) Reinforced Concrete with 200 mm Spacing

Fig. 6. EM Shielding Test Results for Rebar Layer

Fig. 7. Configuration of the Multi-layered Rebar

고 있으며 실질적으로 구조 설계에서 L_s 를 증가시키기 위해서는 구조체의 두께가 증가해야 한다. 따라서 L_s 가 증가하더라도 그에 따른 철근 층 사이의 콘크리트의 두께가 증가하며 콘크리트 매트릭스에 의해 철근 층 사이에서 발생하는 다중 반사 효과가 덜 발생하여 L_s 증가에 따른 전자파 차폐효과를

얻지 못한 것으로 판단된다(Hyun et al., 2014).

Figs. 6(b), (c)는 철근 간격 및 보강 층에 따른 전자파 차폐 결과를 나타낸 것이다. 철근 간격 100 mm 이상에서 보강 층 변화에 따른 전자파 차폐율 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 전자파 차폐성능 향상에 유효한 철근 간격이 아닌 변수에서는 철근 보강 층을 늘리더라도 전자파 차폐성능 향상은 어려울 것으로 판단된다.

3.2.4 철근 격자망 내부 간격에 따른 전자파 차폐

철근 직경의 증가, 철근 중심 간격의 감소는 수평 · 수직 철근으로 구성된 철근 격자망 내부 간격의 감소로 이어진다. 앞선 실험 결과들을 바탕으로 주파수 대역을 3단계로 나누어 철근 격자망 내부 순간격에 대한 최대 전자파 차폐율을 Fig. 8로 나타내었다. 일단 배근의 경우 400 MHz~700 MHz 주파수 대역에서 철근 내부 순간격이 90 mm에서 31 mm로 감소함에 따라 철근 배근에 의한 전자파 차폐율이 증가하며 31 mm의 내부 순간격에서 크게 증가했다. 반면, 1,100 MHz~1,400 MHz 주파수 대역에서는 철근 내부 순간격이 190 mm에서 40 mm로 감소해도 전자파 차폐율은 큰 차이를 보이지 않았다. 이단 배근의 경우 400 MHz~700 MHz 주파수 대역에서 철근 내부 순간격이 190 mm에서 31 mm로 감소함에 따라 철근 배근에 의한 전자파 차폐율이 증가하였고 일단 배근과 달리 더 큰 40 mm의 내부 순간격에서 크게 증가했다. 또한 주파수

(a) Shielding Effectiveness by Single Layer

(b) Shielding Effectiveness by Double Layer

Fig. 8. EM Shielding Test Results for Internal Rebar Grid

대역 1,100 MHz~1,400 MHz에서는 철근 내부 순간격이 190 mm에서 40 mm로 감소함에 따라 전자파 차폐율의 감소가 나타났는데 이는 고주파 대역에서 철근에 의한 전자파 차폐보다 콘크리트 매트릭스에 의한 전자파 차폐가 크기 때문에 더 많은 철근의 배근으로 상대적인 콘크리트 매트릭스의 감소가 발생하기 때문이라고 판단된다.

따라서 철근 격자망 내부 간격은 전자파 차폐율에 큰 영향을 주기 때문에 같은 철근비라도 직경을 줄이고 간격을 작게 하는 것이 전자파 차폐 성능 확보에 유리할 것으로 판단된다(Bihua et al., 2000; Dalke et al., 2000).

3.3 섬유보강 콘크리트에 의한 전자파 차폐

Fig. 9(a)는 철근을 보강하지 않은 두께 100 mm 콘크리트 변수들의 강섬유 혼입률에 따른 전자파 차폐율 결과를 나타낸다. 강섬유를 혼입하지 않은 일반 콘크리트는 10 dB 이하의 전자파 차폐율을 나타내는 반면 강섬유 혼입으로 모든 측정 주파수 대역에서 전자파 차폐율이 크게 향상되었으며 혼입률이 증가할수록 전자파 차폐율이 높아짐을 확인할 수 있다. 이는 강섬유의 혼입을 증가에 따라 콘크리트 내부 전기전도망의 형성이 확장되어 콘크리트 매트릭스 내부의 고유 저항이 감소하고 강섬유 자체의 높은 반사율에 의한 것으로 판단된다(Wen and Chung, 2004).

(a) Concrete Incorporating Steel Fiber

(b) Single Layer Reinforced Concrete Incorporating 1.5 vol.% Steel Fiber

Fig. 9. EM Shielding Test Results for Concrete Incorporating Steel Fibers

철근 배근은 규칙적이고 연속적인 전기전도 격자망을 형성하는 반면에 강섬유는 콘크리트 매트릭스 내부에서 일정한 연속성과 방향성을 갖지 않으며 불규칙적으로 분산 분포한다(Kim and Yi, 2015). 낮은 주파수 영역의 저주파는 직진성이 높은 고주파보다 회절특성과 파장이 크기 때문에 불규칙적 분산 분포로 인한 비연속적인 전기전도망을 형성하는 강섬유보강 콘크리트에서는 낮은 주파수 영역에서 회절특성이 크게 발생할 수 있으며 강섬유의 혼입률이 낮을수록 그 영향은 크다. 이로 인해 실험 결과가 앞선 철근에 의한 전자파 차폐율 실험 결과와는 다르게 낮은 주파수 대역보다는 높은 주파수 대역에서 차폐율이 증가한 것으로 판단되며 이는 다른 연구자들의 실험 결과와 일치한다(Wen and Chung, 2004; Lee et al., 2019).

강섬유를 1.5% 혼입한 콘크리트 변수들의 철근 간격에 의한 전자파 차폐율 실험 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 섬유보강 콘크리트 시험체에서도 철근 간격이 작을수록 높은 전자파 차폐율을 보였으며 특히 낮은 주파수 대역 중 600 MHz에서 가장 큰 전자파 차폐율을 나타내었고 철근 간격을 50 mm로 보강한 변수의 경우 900 MHz에서 최대 차폐율 58.50 dB를 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트의 시험체 두께와 철근 보강에 의한 전자파 차폐율을 평가하였으며, 섬유보강 콘크리트의 강섬유 혼입률 및 철근 간격에 따른 전자파 차폐율을 평가하였다. 본 연구의 범위 내에서 결론은 다음과 같다.

- (1) 구조체의 두께, 주파수는 콘크리트의 주요한 전자파 차폐 영향 인자이며 두께의 증가와 주파수 대역이 높아짐에 따라 콘크리트의 전자파 차폐율이 향상됨을 확인하였다.
- (2) 철근콘크리트의 경우 철근 직경, 철근 간격, 보강 층이 주요한 전자파 차폐 영향 인자이며 낮은 주파수 대역에서 그 효과가 지배적이며 공진이 발생하지 않는 주파수 대역에서는 철근 직경의 증가와 철근 간격의 감소로 인한 철근 격자망 내부 순간격의 감소 및 보강 층의 확장으로 전자파 차폐율이 향상됨을 확인하였다.
- (3) 섬유보강 콘크리트의 경우, 강섬유의 혼입률이 증가할수록 높은 차폐율을 보였으며 낮은 주파수 대역보다는 높은 주파수 대역에서 차폐율이 증가하였고 섬유보강 콘크리트의 철근 간격을 줄였을 때 전자파 차폐 성능이 향상됨을 확인하였다.

이상을 종합하여 보았을 때, 목표 차폐 주파수 대역이 저주파인 경우 철근의 배근 상세를 고주파인 경우 콘크리트 두께 또는 전도성 재료의 혼입을 고려해야 할 것으로 판단되

며 추후 강섬유의 종류 변화 및 강섬유가 아닌 다른 전도성 재료를 혼입한 콘크리트의 전자파 차폐특성 평가에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업 (과제번호: 19S CIP-B146646-02)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- ASTM D 4935. (2010). *Standard test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials*. American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- Bihua, Z., Cheng, G., Bin, C., and Ziming, C. (2000). Experimental investigation of EMP shielding effectiveness of reinforced-concrete cell model. *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. CEEM'2000 (IEEE)*, pp. 296-300.
- Dalke, R.A., Holloway, C.L., McKenna, P., Johansson, M., and Ali, A.S. (2000). Effects of reinforced concrete structures on RF communications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 42, No. 4, pp. 486-496.
- Mardiguian, M., and Caron-Fellens, J.P. (2017). The intelligent concrete: A new, economical technique for architectural shielding of buildings. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, Vol. 6, No. 2, pp. 50-54.
- Hong, H.J., NamGung, C., and Ahn, C.B. (2011). Terahertz tomography with the velocity correction in different mediums. *Proceedings of the KIEE Conference*, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 2043-2044.
- Hyun, S.Y., Lee, K.W., Kim, M.S., and Yook, J.G. (2012). Electromagnetic modeling of shielding effectiveness of reinforced concrete walls. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 23, No. 3, pp. 384-391.
- Hyun, S.Y., Du, J.K., Lee, H.J., Lee, K.W., Lee, J.H., Jung, C., et al. (2014). Analysis of shielding effectiveness of reinforced concrete against high-altitude electromagnetic pulse. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, No. 6, pp. 1488-1496.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). (2007). *IEEE standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures*. IEEE-299-2006, IEEE Standards Association: Piscataway, NJ, USA.
- Jang, H.J., and Song, T.S. (2018). Implementation of concrete block shielding effectiveness measurement system for RF shield. *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 55, No. 12, pp. 85-91.
- Jang, H.J., Song, T.S., Choi, H.S., Kim, S.W., Lee, N.K. (2019). Study on shielding effectiveness measurement method of concrete for RF shield. *Asian Electromagnetics Conference (ASIAEM)*, pp. 84-86 (TC16-5).
- Kim, Y.J., and Yi, C.K. (2015). The UHF wave shielding effectiveness of mortar with conductive inclusions. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 31, No. 4, pp. 103-110.
- Korean Concrete Institute (KCI). (2017). Structural design code for concrete.
- Lee, H.S., Park, J.H., Singh, J.K., Choi, H.J., Mandal, S., Jang, J.M., et al. (2020). Electromagnetic shielding performance of carbon black mixed concrete with Zn-Al metal thermal spray coating. *Materials*, Vol. 13, No. 4, 895. doi:10.3390/ma13040895
- Lee, N.K., Park, G.J., Park, J.J., and Kim, S.W. (2019). A study on the electrical conductivity and electromagnetic shielding of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC). *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 23, No. 2, pp. 37-43.
- Richalot, E., Bonilla, M., Wong, M.F., Fouad-Hanna, V., Baudrand, H., and Wiat, J. (2000). Electromagnetic propagation into reinforced-concrete walls. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 3, pp. 357-366.
- Seo, M.J., Chi, S.W., Kim, Y.J., Park, W.C., Kang, H.J., and Huh, C.S. (2014). Electromagnetic wave shielding effectiveness measurement method of EMP protection facility. *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 25, No. 5, pp. 548-558.
- U.S. Department of Defense (DOD). (1998). *High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection for ground-based C4I facilities performing critical, time-urgent missions, Part 1 fixed facilities*. MIL-

- STD-188-125-1, Department of Defense Interface Standard, Department of Defense: VA, USA.
- Wen, S., and Chung, D.D.L. (2004). Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 329-332.
- Yehia, S., Tuan, C.Y., Ferdon, D., and Chen, B. (2000). Conductive concrete overlay for bridge deck deicing: Mixture proportioning, optimization, and properties. *Materials Journal*, Vol. 97, No. 2, pp. 172-181.
- Yoo, D.Y., Banthia, N., Lee, J.Y., and Yoon, Y.S. (2018). Effect of fiber geometric property on rate dependent flexural behavior of ultra-high-performance cementitious composite. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 86, pp. 57-71.
- Yuan, T.F., Yoo, D.Y., Yang, J.M., and Yoon, Y.S. (2020). Shear capacity contribution of steel fiber reinforced high-strength concrete compared with and without stirrup. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 14, Article No. 21. doi: 10.1186/s40069-020-0396-2

Received	July 8, 2020
Revised	July 9, 2020
Accepted	July 29, 2020